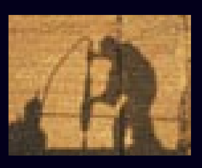
GRAINS DE BÂTISSEURS








La matière en grains, de la géologie à l'architecture

Romain ANGER - Laetitia FONTAINE

CRATerre Edition



Une publication CRATerre - ENSAG
En collaboration avec les CCSTI de Grenoble et de Chambéry
Projet soutenu par la Région Rhône-Alpes, CSTI, Culture Scientifique, Technique et Industrielle
Livret financé par le Contrat Global de Développement « Isère, Porte des Alpes »





AUTEURS
Romain ANGER
Laetitia FONTAINE

RESPONSABLES DE PROJET
Hugo HOUBEN
Patrice DOAT


CONTRIBUTIONS SCIENTIFIQUES
Henri VAN DAMME, ESPCI, Paris
Jean-Marie DELARUE, EAPM, Paris



DIRECTEUR DE PUBLICATION
Thierry JOFFROY



DESIGN GRAPHIQUE
Arnaud MISSE



PHOTOS
CRATerre – ENSAG
sauf indications



IMPRESSION
Bastianelli-Clerc





CRATerre Edition
BP 23, rue de la Buthière, Maison Levrat,
Parc Fallavier
38092 VILLEFONTAINE cedex, France

Romain ANGER - Laetitia FONTAINE

GRAINS DE BÂTISSEURS

La matière en grains, de la géologie à l'architecture



« Que sait du désert celui qui ne regarde qu'un grain de sable ? »

Erik Orsenna

CRATerre Edition

PRÉFACE

A l'heure des sociétés numériques et des bio- ou des nano-technologies, peut-on penser que la connaissance de la substance la plus commune qui soit – la terre – soit encore un enjeu scientifique? Peu de substances sont aussi solidement ancrées dans notre subconscient individuel ou collectif que ce mélange de grains infiniment varié. Indissociable de l'eau qui lui donne forme et qui l'a générée, la terre - au même titre que la mer - a pendant longtemps été un symbole-refuge de stabilité, un substrat éternel apte à pourvoir de façon indéfiniment renouvelée à nos besoins alimentaires et à fournir une matière première tout aussi indéfiniment recyclable pour l'habitat et la création artistique. La culture sur sol reste de très loin le mode dominant de production agricole et tous les continents sont couverts d'exemples étonnants d'architecture de terre.

Mais alors que la richesse et, dans le même temps, la fragilité des océans ont fait l'objet d'une prise de conscience générale, les ressources du matériau terre pour la construction restent encore largement ignorées. Qui sait, dans les pays dits développés, qu'un tiers de l'humanité y trouve un abri? Que des villes entières, des rivages andins aux confins de l'Asie en passant par l'Afrique sub-saharienne, ont été érigées? Que l'audace et la beauté architecturales n'y cèdent en rien à celles de nos orgueilleuses mégalopoles? Qui sait (hormis ceux qui y habitent, et encore...) que l'habitat rural est, dans certaines régions de France, un habitat de terre? Certes, l'attrait des destinations lointaines révèle à un nombre croissant de voyageurs «l'impérative beauté» de ces cités. Mais peu ont franchi le pas allant de l'admiration de cette architecture-sculpture à l'idée que, peut-être, il y avait là une solution concrète, généralisable, à nos désirs de développement durable...

La Nature, en désagrégeant les roches, en transformant les fragments les plus fins ou les cendres volcaniques en argile, nous a fait cadeau d'un trésor. Si la partie la plus fine, la plus vivante et la plus riche en matières organiques de ce trésor doit incontestablement être réservée à la production végétale, sa partie inerte (biologiquement parlant) offre encore des possibilités étonnantes. Pourquoi utiliser des matériaux artificiels à hautes performances mécaniques et au contenu énergétique (pour leur fabrication) important pour construire des structures somme toute modestes comme les habitations individuelles? Pourquoi développer des cloisons et des super-isolants minces et, en parallèle, aller chercher à plusieurs mètres sous terre, par pompe à chaleur interposée, l'inertie thermique nécessaire à la climatisation, alors qu'un mur de terre peut apporter à la fois isolation et climatisation. Pourquoi centraliser en usine puis transporter ce qu'un artisan peut faire sur chantier avec des matériaux locaux? Technologie sans simplicité n'est que gadget. Ayons la modestie d'apprendre des constructeurs de Djenné, de Yazd, de Shibam ou de ShangriLa.

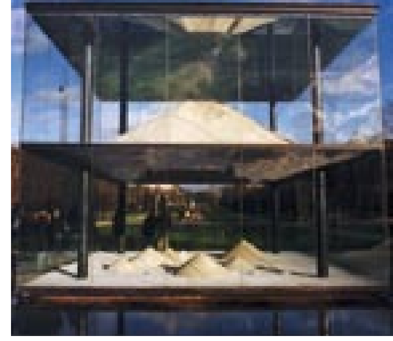
Pour ne pas rester incantatoire, un discours de ce type ne peut ignorer les contraintes que la société industrielle a irréversiblement introduites. Normes et garanties sont désormais incontournables (et souhaitables). L'usage de la terre devra donc s'appuyer sur des connaissances du même niveau que celles qui sous-tendent l'usage des polymères, des métaux, des composites et de tous les matériaux de construction classiques. Par un heureux hasard (?), la physique et la mécanique de la matière divisée et même ultradivisée sont des domaines qui s'épanouissent. Cette terre canoniquement simple qu'est le sable (sec) a fourni l'un des sujets de recherche les plus novateurs de ces vingt dernières années en physique de la matière condensée. L'état granulaire de la matière fait désormais partie des états de référence de la matière, au même titre que l'état liquide ou l'état gazeux. Ce que l'on a découvert (l'on découvre) a ouvert des perspectives étonnantes pour la compréhension du comportement des foules et du trafic automobile. Par rapport au sable, la terre introduit un degré de complexité supplémentaire, plus physico-chimique, aux échelles les plus fines de la matière en grains. Mais là encore, les circonstances sont favorables. L'éclosion des nanosciences met (ou remet, car la physico-chimie des colloïdes et des interfaces ne date pas d'hier) au goût du jour les questions à résoudre. Les préoccupations environnementales font le reste.

Ami visiteur, les expériences que Laetitia et Romain ont concoctées avec soin et talent te révèleront les multiples facettes surprenantes de la matière en grains, la forme la plus répandue de matière sur notre planète. Satisfais ta curiosité et «mets la main à la pâte», mais n'oublie pas qu'il s'agit d'un art de bâtir et garde dans un coin de la tête les merveilles qu'un jour tu brûleras de contempler en face.

Henri Van Damme
Professeur à l' Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles

[1] Cette expression est le titre d'un merveilleux ouvrage de Serge Berthier sur l'origine physique des couleurs iridescentes des ailes de papillons.
[2] L'opération «Main à la pâte», initiée par Georges Charpak, a pour but de faire découvrir les sciences dès l'école primaire, par l'expérience et l'observation.
[3] 17 % des œuvres inscrites au patrimoine mondial de l'Unesco sont des édifices en terre.

GRAINS DE BÂTISSEURS, UN ATELIER PÉDAGOGIQUE

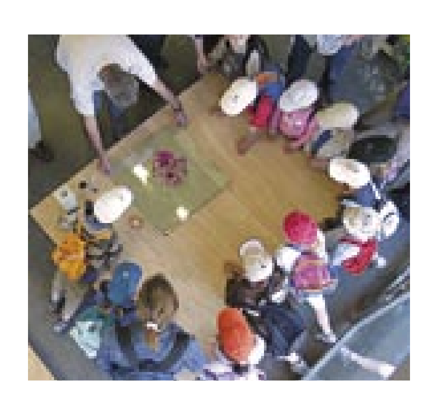


↑ Sablier géant du sculpteur Jean Bernard Métais à Paris, 2000.

« Grains de Bâtisseurs - La matière en grains, de la géologie à l'architecture », est un atelier pédagogique où l'on peut manipuler une centaine d'expériences interactives et contre-intuitives sur la matière en grains minéraux permettant d'acquérir, par un cheminement qui va de la géologie à l'architecture, une culture scientifique et technique de la matière en grains.

L'atelier vise à faire découvrir de façon ludique la physique des grains, à faire aimer la science et ainsi susciter des vocations scientifiques en particulier parmi les jeunes, facilitant la compréhension de l'architecture, et réintroduisant la notion de territoire, porteuse de valeurs culturelles, façonnées par le lien naturel qui existe entre la géologie et la géographie de la région et la présence des matériaux disponibles qui sont utilisés par ses habitants pour se loger.

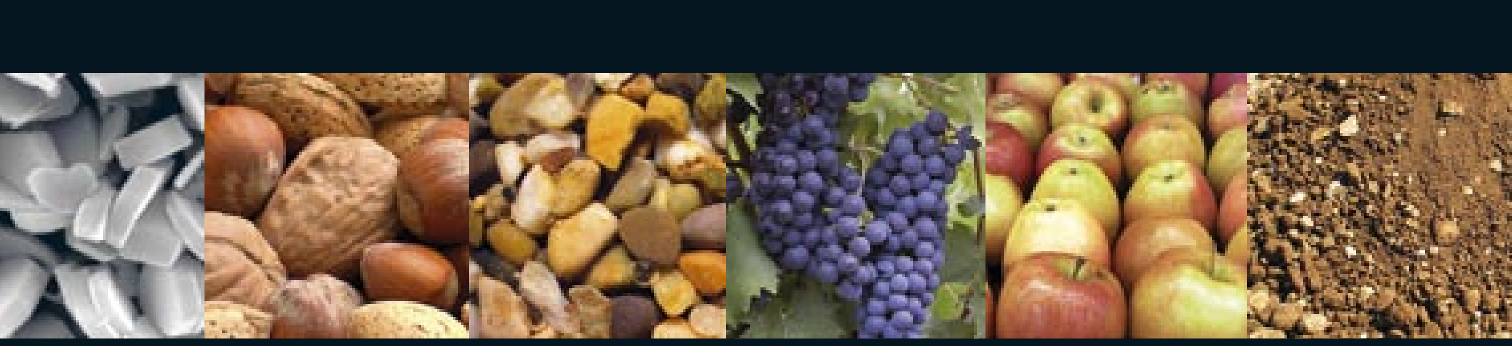
Certaines expériences reproduisent des phénomènes naturels (rides de sable) et suscitent l'émerveillement devant des choses qu'on a toujours vu sans regarder. Elles peuvent inspirer un attachement à la nature et à la terre et susciter le goût de l'observation du monde environnant.
Le lien entre la géologie et l'architecture de terre est fondamental. Il met en valeur l'idée forte que l'on construit avec ce que l'on a sous les pieds. Chaque grain a une histoire géologique, qui permet de mieux comprendre sa nature. Avec la terre, on fait un béton naturel, c'est-à-dire une roche reconstituée. Il existe des cycles de vie de la terre ou des sédiments, qui proviennent d'une roche et qui vont reconstituer une roche. En construisant en terre, on reproduit ce mécanisme géologique qui se produit sur des millions d'années. La vision d'une histoire humaine qui s'inscrit dans une histoire géologique invite à reconsidérer notre place dans l'univers.



Ce fascicule présente quelques-unes des expériences de l'atelier Grains de Bâtisseurs, agencées selon un cheminement qui, tout en faisant découvrir le fonctionnement de base de la matière en grains, invite à passer successivement de la géologie à la construction et à établir des liens entre les paysages, la matière et l'architecture. Dans ce circuit initiatique, beaucoup plus que la découverte de lois qui gouvernent la matière, c'est une transformation des conceptions du monde qui est en jeu. On est tour à tour invité à changer d'échelle, à la fois au niveau spatial (de l'infiniment petit à l'infiniment grand) et temporel (temps humain et temps géologique) et à porter un regard attentif sur la nature.

OMNIPRÉSENCE DES GRAINS

De l'atome jusqu'aux plus lointaines galaxies, les grains sont à la base de notre monde. Ils sont omniprésents dans notre univers quotidien sous toutes les formes : sable, graviers, cailloux, roches, oranges, noix, pommes, riz, blé, maïs, poivre, sel, farines, fumées, poudres pharmaceutiques, etc. La matière en grains est le deuxième produit traité, utilisé, consommé par l'homme juste après l'eau. 10 % de l'énergie domestiquée sur notre planète est utilisée pour le traitement de grains de diverses tailles et origines. 70 % des objets que nous utilisons sont passés, à un stade ou l'autre de leur fabrication, sous forme de poudres ou de grains. Le traitement industriel des poudres et grains représente quelques dizaines de milliards de tonnes par an. Les grains, sous toutes leurs formes, constituent un intérêt économique et humain gigantesque.



↑ Diversité et universalité de la matière en grains





DES GRAINS PÉDAGOGIQUES

La matière en grains est extrêmement commune et pourtant elle recèle de nombreux phénomènes inconnus : elle est « contre-intuitive » par excellence. La surprise et l'étonnement jalonnent l'itinéraire de découverte proposé et motivent à en savoir davantage. Mélangeons des sables différents, ils se séparent. Vibrons du sable, il se structure en de magnifiques paysages miniatures. Faisons couler du sable dans l'eau, au lieu de se déliter, il forme une colonne. Au terme de ce voyage au cœur de la structure interne de la matière en grains, se dessinent des problématiques communes entre la terre, le béton de ciment et le château de sable.

Exposition « Grains d'Isère », Grands Ateliers, Villefontaine, Juin 2005.
Vue d'ensemble d'une partie des manipulations.



DE LA GÉOLOGIE À L'ARCHITECTURE

90 % de la surface de la terre est couverte de grains. Le sable est présent en d'énormes quantités dans les déserts qui couvrent plus de 10 % de la surface émergée de la planète. Les plages et les fonds marins constituent d'énormes réservoirs naturels de sable. Les sols sont constitués d'un ensemble de grains de tailles diverses (graviers, sables, limons et argiles) provenant de la désagrégation et de l'altération des roches.
C'est donc en toute logique que l'Homme, qui se sert des matériaux locaux à sa disposition, utilise des grains pour construire. On estime qu'au minimum 30 % de la population mondiale vit dans des constructions en terre et 17 % des constructions inscrites sur la Liste du patrimoine mondial de l'UNESCO sont des oeuvres architecturales en terre. Dans de nombreux cas, à des centaines de kilomètres à la ronde, l'Homme ne dispose pas d'autres matériaux. Parfois, il ne dispose même pas de terre. Ainsi, des pans entiers de la grande muraille de Chine sont faits de sable.
Le cas des bétons de ciment est très étonnant : un béton est un ensemble de grains qui ne sont pas liés entre eux par des liaisons chimiques mais exclusivement physiques. C'est un matériau divisé ! Pourtant, on est capable d'agencer tous ces grains entre eux dans des configurations spatiales qui permettent d'approcher la résistance de l'acier.

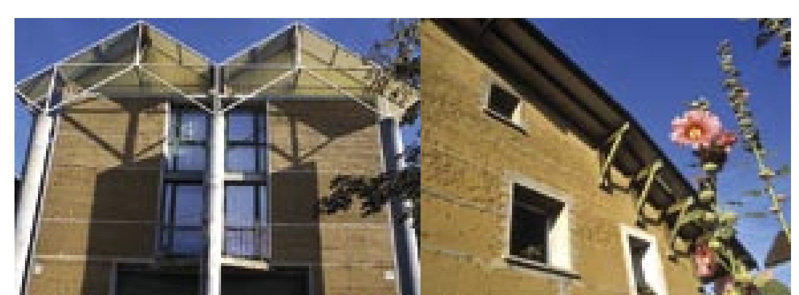


↑ Grains, eau et architecture

Au fond
Paysage du Nord Isère, La Carrière d'Artas

LA TERRE

La terre est une énigme. Ce matériau si commun mais pourtant si étrange est constitué de grains (cailloux, graviers, sables, silts et argiles), d'eau et d'air qui forment un sol avec une histoire géologique. A partir de ces trois éléments, on obtient un matériau solide qui permet de construire un mur, une structure, un édifice. C'est ainsi que l'on passe du grain à l'architecture. Tous ces grains tiennent ensemble comme par magie. Pour comprendre pourquoi ils tiennent ensemble, il faut réapprendre ce qu'est un sable ou une poudre, réapprendre ce qu'est un liquide et un gaz. Porter un regard neuf sur la matière. Et en particulier sur toutes ces choses communes que l'on croyait connaître.



↑ Le Domaine de la Terre, 1983, Villefontaine.
O. Perreau-Hamburger, J.-M. Savignat et M. Monteanu
↖ G. Perraudin & F. Jourda Architectes





↑ Paysage du Nord Isère, Champier
← La Carrière d'Artas

UNE MATIÈRE FLUIDE ET SOLIDE À LA FOIS

L'intérêt des matériaux granulaires pour la construction réside dans leur faculté exceptionnelle d'épouser parfaitement la forme du coffrage ou du moule dans lequel ils sont mis en œuvre avant de devenir solide et résistant. C'est le cas du béton, véritable « pierre qui coule », comme du pisé, qui prend la forme du coffrage comme un liquide et devient solide par simple compression. Cette propriété de pouvoir se présenter à la fois sous forme liquide ou solide n'est pas exclusive à ces matériaux. On la retrouve dans toute matière constituée de grains, qui ne peut être classée dans les traditionnelles catégories solide-liquide puisqu'elle adopte alternativement le comportement de l'un ou de l'autre.



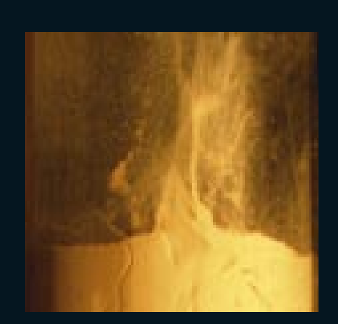
↑ MANIPULATION 4
Au repos, le sable se présente sous la forme d'un tas. Un liquide ne peut adopter cette forme. Comme un solide, le tas de sable peut supporter de fortes charges. Pourtant si l'on incline le support, le sable s'écoule comme un liquide. Et il forme à nouveau un tas capable de supporter un poids.

MANIPULATION 6 →

Les poudres présentent aussi des analogies étonnantes avec les liquides. Cette poudre silteuse s'écoule sur un support incliné et forme des gouttes similaires à l'écoulement d'un liquide sur une vitre.







← MANIPULATION 7

La matière en grains n'est jamais constituée uniquement de grains. Elle contient toujours de l'air. Ce tube a été rempli de poudre. Placé à la verticale, des bulles d'air s'échappent et forment de petits geysers de poudre à sa surface. La quantité de gaz contenue dans les grains est impressionnante. Il faut taper plusieurs fois le tube contre le sol avant que le phénomène ne s'estompe. L'air en s'évacuant trace des arborescences similaires à des lits de rivières.

EMPILEMENTS DE GRAINS

↓ MANIPULATION 15

Vers la compacité ultime

Comment remplir au maximum un espace uniquement avec des boules ? La solution mathématique idéale est l'empilement apollonien, dans lequel chaque interstice entre 4 sphères est rempli par une sphère tangente à ces 4 sphères, et où ce principe est reproduit à l'infini dans le but d'atteindre la compacité ultime.

La terre à pisé de la région contient des particules de granulométrie très étendue, du galet de 10 cm aux particules d'argiles de quelques microns, qui contribuent à construire un squelette granulaire compact. Elle constitue à ce titre un excellent matériau de construction.

Tout comme un édifice, un sol est construit, il possède une structure, dont la forme et la solidité dépendent en partie du pourcentage des grains qui le constituent. L'étude des empilements permet de présenter succinctement la manière dont s'organisent les atomes dans la matière cristalline et de se familiariser avec la notion de compacité qui joue un rôle fondamental dans la résistance des matériaux granulaires tels que la terre ou le béton. Un vide constituant toujours une zone de faiblesse, il est intéressant d'observer les empilements de grains qui permettent de remplir le maximum d'espace afin d'obtenir le matériau le plus dense possible et de présenter les modèles d'empilement les plus récents dont se servent aujourd'hui les chercheurs pour concevoir des bétons à hautes performances.

↓ MANIPULATION 14

Dans un cadre transparent, il est possible de visualiser le phénomène en coupe et d'observer le sable fin s'écouler entre les gros grains. Il remplit peu à peu les pores, ce qui explique pourquoi un mélange de grains est plus compact que les mêmes grains pris séparément.

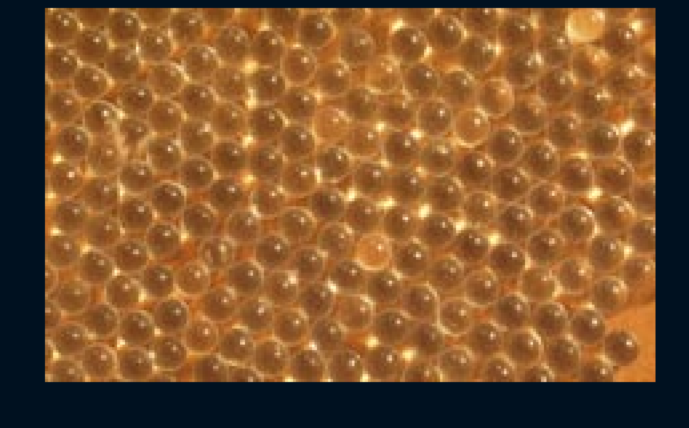


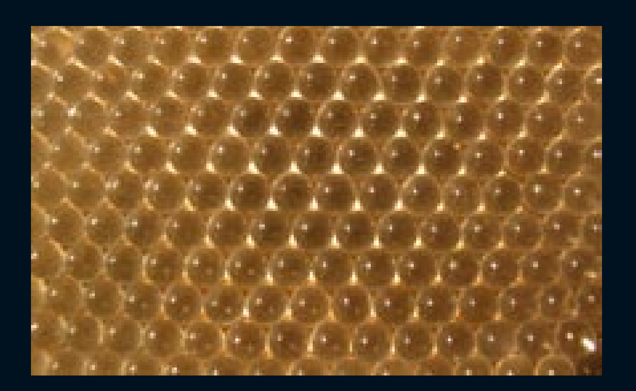


↑ MANIPULATION 12

Mélange de grains de deux tailles différentes

Deux récipients de même volume sont remplis l'un avec du gravier et l'autre avec du sable. Les deux types de grains sont mélangés et les deux récipients sont à nouveau remplis avec ce mélange. On obtient un ensemble plus compact dont le volume est inférieur à celui des grains pris séparément. Dans la matière en grain, un plus un n'est pas égal à deux !





←↑ MANIPULATION 10

Des sphères de même taille sur un plan

Un cadre transparent est rempli de billes de verre. Sa manipulation permet d'observer la manière dont les billes s'empilent, en particulier l'empilement ordonné, le plus compact, et l'empilement désordonné. Lorsque les atomes s'organisent selon des structures régulières et ordonnées, on parle de « cristal » et de solides cristallins. Dans le cas de structures atomiques désordonnées, on parle de solides amorphes.

SUR LE TAS

Un tas de sable constitue à lui seul une mine d'informations. Son organisation révèle en particulier l'existence des forces de frottements, qui sont responsables de la pente du tas qui structure un grand nombre de paysages dans la nature. Uneh observation attentive du fragile équilibre de sa surface, où se succèdent sans cesse, au cours de l'écoulement, les phases de stabilité et d'instabilité, permet de se familiariser avec l'état d'équilibre particulier de cet objet : au lieu d'adopter une forme stable (comme un liquide qui présente une surface horizontale), il se place dans un état d'équilibre que l'on peut qualifier de « critique » puisqu'à chaque instant, les grains à sa surface sont à la limite du déséquilibre. On découvre ainsi que deux angles sont nécessaires pour décrire l'équilibre du tas : l'angle de repos et l'angle d'avalanche.



↑ MANIPULATION 16

La pente d'équilibre

Si l'on verse du sable sur une surface plane avec un débit constant, les grains forment tout d'abord un petit tas dont la base grandit au fur et à mesure que le monticule s'élève. Le tas se forme par avalanches successives, qui permettent au tas de conserver une « pente d'équilibre ». Au fur et à mesure que le tas grossit, la pente reste constante. Le tas adopte la forme d'un cône de révolution. On appelle « angle de repos » ou « angle de talus » l'angle que forme la surface du tas avec l'horizontale. Cet angle est caractéristique des grains utilisés. Si on reforme le tas, il adoptera toujours le même angle de repos.





↑→ MANIPULATION 17

L'angle de repos et l'angle d'avalanche

On peut observer la pente du sable dans un cadre circulaire que l'on fait tourner sur son axe : quand la pente devient trop inclinée, une avalanche réorganise la pente selon l'angle de repos. L'angle au-delà duquel la pente du sable devient instable est appelé l'« angle d'avalanche » et est plus grand d'environ 2 degrés pour les sables. Les écoulements de sable ainsi formés ramènent systématiquement le sable à son angle de repos.

L'ANGLE DE REPOS...

← MANIPULATION 24

l'effet volcan

Du sable fin étalé sur une plaque vibrante se réorganise de manière spectaculaire pour dessiner des reliefs semblables à des paysages. Les reliefs complexes obtenus sont structurés par l'angle de repos. Leur beauté réside sans doute dans leur lien de parenté avec certains paysages naturels : réseaux complexes de vallées, de lits de rivières et de leurs affluents. ↘





↑ Exemple de surface réglée complexe réalisée avec du sable.
Le sable se révèle être un outil particulièrement simple et adapté pour explorer la géométrie des surfaces à pente constante.



...ET LES PAYSAGES NATURELS

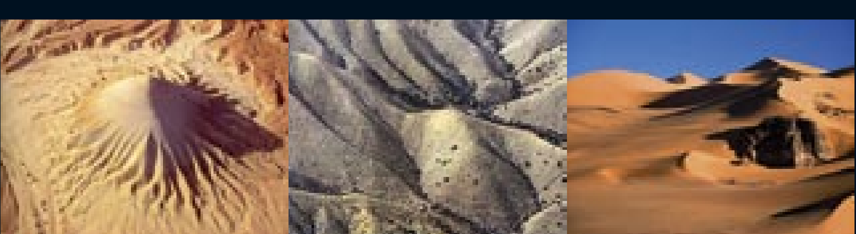
Les paysages naturels en terrains meubles

L'angle de repos du tas de sable, compris entre 30 et 35°, se retrouve fréquemment dans la nature.
Certains paysages sont modelés, structurés par leur pente : la forme conique d'un volcan exhibe une pente parfaitement régulière. Mais le cône de révolution n'est qu'un exemple très particulier des surfaces réglées d'égales pentes. Ces surfaces peuvent définir des volumes beaucoup plus complexes et déboucher sur une grande diversité de formes et de paysages. Les dunes de sable avec leurs formes longues et sinueuses sont des parfaits exemples de surfaces réglées complexes. Les rides de sable formées sur les dunes sont aussi le fruit de la structuration du sable selon son angle de repos.

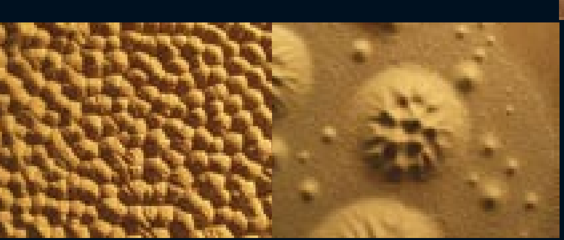


↑ Paysage du Nord Isère, La Carrière d'Artas
L'angle de repos du tas de sable est compris entre 30 et 35°





↑ Paysages structurés par leur pente : volcans, terrains érodés, dunes de sable.



LA SÉGRÉGATION



↑ Strates de granulats dans un sol du Nord Isère.

Mélanger des grains différents, ils se séparent! Ceux-ci semblent ici violer un grand principe d'entropie : plus on tente d'augmenter le désordre du système par la mise en mouvement de sable ou de poudre, plus les grains se réorganisent, se classent par catégorie de taille ou de forme et se séparent. Il s'agit du phénomène de ségrégation granulaire, qui pose beaucoup de problèmes aux industries du mélange comme l'industrie pharmaceutique (lors de la fabrication de médicaments, il est nécessaire de mélanger des poudres de tailles et de formes différentes) ou l'industrie du béton (un mauvais mélange des composants du béton – ciment, granulats, adjuvants – a des conséquences sur la tenue mécanique de l'ouvrage). Ce phénomène est courant dans la nature, notamment lors du transport des grains qui sont séparés par certains agents comme le vent ou l'eau pour former différents types de dépôts et de paysages. On retrouve ces figures de gradation dans les roches sédimentaires ou dans les dépôts du fond des océans, où la taille des particules diminue lorsque l'on va de bas en haut. Les grains sont classés lors de la sédimentation : la géologie parle de « granoclassement » pour désigner ce phénomène.











↑ MANIPULATION 26

Ségrégation dans un tas

Un mélange de silt noir et de sable blanc contenu dans un gobelet percé s'écoule à l'intérieur d'un cadre transparent. Peu à peu les grains se séparent : les plus gros grains se placent sur les côtés alors que les grains de silt restent au centre. La figure obtenue se présente sous forme de strates, semblable à un sapin de noël.



L'expérience précédente (manipulation 26) peut être reproduite avec divers types d'agrégat, terre et sable. Ici avec du sable blanc et de la terre rouge tamisée à 100 microns

Ségrégation dans un tas de terre à pisé : les plus gros grains se retrouvent généralement à la base du tas (sur la circonférence) et les grains fins restent au sommet (au centre du tas).

MANIPULATION 28

Ségrégation dans une bétonnière

Un mélange constitué de grains de 3 tailles différentes est placé dans un disque que l'on peut faire tourner sur son axe comme une roue de vélo : il se sépare par catégorie de taille. Les plus fins restent au centre et dessinent une figure en forme d'étoile à branches multiples.



LES CHAÎNES DE FORCES









↑ MANIPULATION 36
des arcs de poudre
Un cadre muni d'une trappe à la base est rempli de poudre rouge. Lorsque la trappe est ouverte, il se forme des arcs au-dessus de l'ouverture.

Dans un ensemble de grains, les efforts se distribuent d'une manière bien particulière. Par contact et frottement, les contraintes sont réparties dans la matière par un réseau de « chaînes de forces » qui ont tendance à répartir les efforts verticaux sur les côtés. Ces chaînes de contacts solides sont bâties à l'image des voûtes de cathédrales. Ces « effets de voûtes » ont des conséquences néfastes dans de nombreuses applications industrielles. Dans l'industrie agroalimentaire par exemple, les grains sont souvent stockés dans des réservoirs, les silos, constitués d'une partie supérieure cylindrique et d'une partie inférieure convergente. Lors de la vidange de ce réservoir, il se forme parfois une voûte au niveau de l'orifice, qui bloque totalement l'écoulement. Dans le domaine de la construction, les effets de voûtes peuvent créer de petits espaces au sein de la matière protégés par un ensemble de grains en contact qui empêchent l'empilement de se placer dans sa configuration la plus compacte. Avec des grains arrondis, les voûtes sont plus instables et la matière se comprime plus facilement. D'autre part, la dispersion des efforts sur les côtés oblige à utiliser des coffrages résistants, que ce soit dans le cas du pisé ou du béton. Dans d'autres cas, la distribution des forces au sein d'un édifice granulaire peut être mise à profit de manière très efficace : depuis 200 ans, les performances des ballasts des chemins de fer, simplement constitués de granulats, restent inégalées. Ils ont la propriété unique d'être auto-adaptatifs : souples pour de faibles charges, rigides pour les charges les plus importantes.

↓ La pierre percée du Dauphiné, Située à Pierre-châtel. Les arcs sont des formes récurrentes dans la nature. Il en existe de toutes formes et de toutes tailles. Les structures obtenues sont d'une grande stabilité et leur durée de vie peut être extrêmement longue. L'arc existe à des échelles de taille très différentes.



La distribution des forces dans la matière →

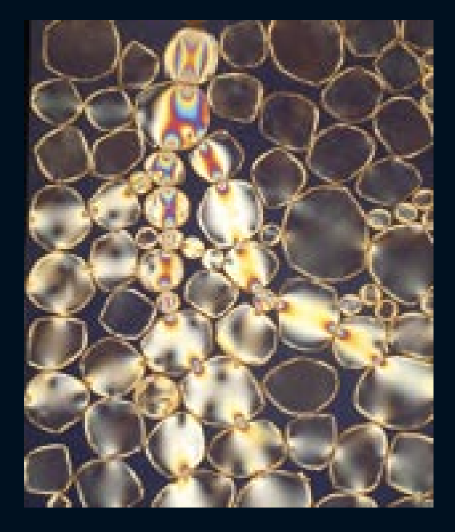
Au sein de la matière en grains se constitue un réseau de contacts qui génèrent les phénomènes de blocages. C'est par ce réseau que vont se propager et se distribuer les forces dans la matière.

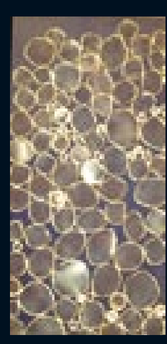


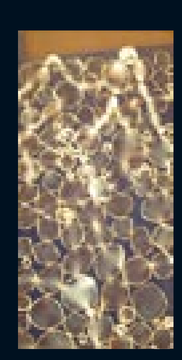
Les phénomènes de blocages →

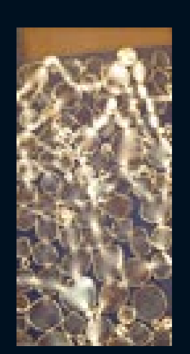
Ces arcs et ces voûtes ne sont que la partie visible d'un ensemble de réseaux de contacts qui se forment au sein de la matière en grains. Ces « effets de voûtes » sont responsables de nombreux phénomènes de blocages.

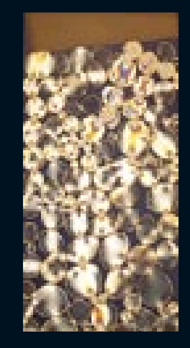
↑ MANIPULATION 40
Un bâton est placé dans un récipient cylindrique. L'espace entre le bâton et les parois est rempli de sable. Celui-ci est légèrement tassé en tapant sur les côtés du récipient. Le bâton devient impossible à retirer comme s'il était pris dans du béton.











↑ MANIPULATION 41
En lumière polarisée, un matériau photoélastique change de couleur en fonction de la contrainte qu'il subit. Un ensemble de grains plats découpés dans un matériau photoélastique est placé entre deux films polarisés sur un banc de photoélasticimétrie. On peut alors visualiser le trajet des chaînes de forces dans un empilement granulaire en présence d'une contrainte (quand on appuie sur le haut de l'empilement avec une baguette). Lors de la mise en œuvre du pisé, les coups du pisoir sont redirigés dans les coffrages. Ceux-ci doivent être extrêmement résistants pour vaincre les poussées horizontales. L'intensité des couleurs est proportionnelle à l'intensité des contraintes et les grains du bas sont beaucoup moins contraints que ceux du haut. Le pisé se met en œuvre par couches minces : si la couche est trop épaisse, aucune force de compression n'est transmise au bas de la couche.

DE L'EAU POUR CONSTRUIRE

Après un survol des phénomènes liés aux milieux granulaires secs, on découvre les milieux granulaires humides. Les seules forces qui se trouvent à l'intérieur du sable sec sont les forces de contact et de frottement entre les grains. Dès que l'on ajoute de l'eau, on ajoute les forces capillaires responsables de la tension superficielle des liquides. C'est cette tension de surface qui permet de construire les châteaux de sable.

↓ MANIPULATION 42

Du sable sec s'écoule dans deux assiettes dont l'une a été remplie d'une nappe d'eau de 1cm d'épaisseur environ. Dans l'assiette sèche (en haut), le sable forme un tas, par avalanches successives. Dans l'eau (en bas), une « stalagmite » se forme.



Termitière au Burkina Faso →



En l'absence de cohésion, l'angle de repos est un élément structurant de la matière en grains. A sec, les grains sont soumis aux seules forces de contact et de frottement : c'est la physique des milieux granulaires secs ou « physique du tas de sable ».

L'eau, au lieu de déconstruire le tas de sable, construit une structure beaucoup plus verticale qui est le fruit de l'action conjuguée des remontées capillaires et de la cohésion capillaire : c'est la physique des milieux granulaires insaturés ou « physique du château de sable ».



← MANIPULATION 46

De même qu'entre l'eau et l'air, il existe une tension d'interface entre l'eau et l'huile. Dans un verre rempli de ces deux liquides, l'interface apparaît comme une toile tendue élastique qui s'allonge quand on appuie dessus.

↓ MANIPULATION 48

Des gouttes d'eau dans l'huile minimisent leurs surfaces de contact et leur énergie en prenant la forme de sphères parfaites. La sphère est la plus petite surface pouvant contenir un volume donné, ce qui explique la forme arrondie des perles d'eau dans l'air, et dans l'huile.

L'ÉTAT LIQUIDE

L'importance de l'état liquide pour notre vie quotidienne et pour nos activités industrielles est évidente. Pourtant, des trois états usuels de la matière, c'est celui qui est le plus mal compris. Les liquides sont des états denses et fluides de la matière. La propriété la plus remarquable des liquides est celle de s'écouler. Ce n'est pourtant pas la seule. On oublie souvent une autre propriété remarquable des liquides qui est celle de la cohésion et des forces de surfaces : un liquide est un milieu dense caractérisé par une forte cohésion, comme celle d'un solide. A cause de cette cohésion, il exerce une force sur sa surface extérieure (tension superficielle) qui tend à être aussi réduite que possible. Un liquide peut ainsi exercer une force attractive entre deux surfaces agissant alors comme une « colle » pour les grains dans un château de sable ou dans un mur en terre. Il est donc important de se familiariser avec ces forces capillaires avant de s'intéresser à la cohésion du pâté de sable.

La tension superficielle

Une observation attentive de la surface de l'eau permet d'oublier un instant sa fluidité et de découvrir qu'elle est capable d'adopter des formes géométriques très stables. Perles d'eau, ondes, gouttes sont des morphologies de l'eau fréquentes dans la nature. « La peau de l'eau » est comme une membrane tendue caractérisée par une tension superficielle qui s'oppose à ses déformations. Certains insectes utilisent cette tension superficielle pour se déplacer sur la surface de l'eau. Elle existe dans tous les liquides et est proportionnelle à l'énergie de cohésion : c'est l'expression « externe » de l'intensité des interactions attractives « internes » existants entre les molécules (ou ions) du liquide.



→ MANIPULATION 45
Du sable fin s'écoule très facilement d'une salière, alors que l'eau reste bloquée. On peut reproduire l'expérience avec des poudreuses dont les trous sont plus importants : l'eau ne coule toujours pas. Le résultat est le même avec une poudreuse dont les trous sont encore plus larges. Le sable semble plus fluide que l'eau. L'eau ne coule pas à travers la poudreuse car sa tension superficielle empêche les bulles d'air de rentrer dans le récipient.

LA COHÉSION CAPILLAIRE



Il est impossible de réaliser un château de sable avec du sable sec : ce dernier ne présente quasiment aucune cohésion. Dès que l'on réalise une pente trop forte, une avalanche se déclenche et ramène la pente à la valeur de l'angle de repos déterminée par le coefficient de frottement du sable. Pour faire un pâté de sable, il faut ajouter de l'eau. L'eau confère son énergie de cohésion au sable et permet, à partir d'un ensemble divisé, d'obtenir un matériau cohésif.
Il existe un optimum de teneur en eau pour lequel le sable mouillé est particulièrement cohésif. Dès qu'il est trop mouillé, il perd sa cohésion. Ceci est lié à la formation de ponts liquides entre les grains. Dans un premier régime, la cohésion augmente avec l'humidité relative, pour atteindre un optimum. Au-delà, lorsque la présence de film liquide devient visible, la cohésion s'écroule rapidement pour finalement s'annuler lorsque le sable est saturé, c'est-à-dire lorsque tout l'espace poreux est rempli d'eau.

↑ MANIPULATION 60

L'eau est une colle

Si on trempe sa main dans un bac d'eau puis dans un bac rempli de billes de polystyrène, celles-ci recouvrent toute la main. L'eau les colle, de la même manière qu'elle colle les grains de sable.



MANIPULATION 64 →

Taille des grains, taille des ménisques, cohésion

Un pâté de sable fin résiste à une charge beaucoup plus importante qu'un pâté de sable grossier

↓ MANIPULATION 58

Pont capillaire

Une goutte d'eau se trouvant entre deux surfaces qu'elle mouille forme un pont capillaire et exerce une force attractive sur celles-ci.

↓ MANIPULATION 57

Lien entre tension superficielle et cohésion

Il est impossible d'empiler des billes de verre en pyramide lorsqu'elles sont sèches. Mais en rajoutant quelques gouttes d'eau sur les billes, on peut construire une structure qui s'oppose à la gravité.

↓ MANIPULATION 56

Lien entre tension superficielle et cohésion

Il suffit de déposer quelques gouttes d'eau au centre d'un cadre rempli de billes pour que, en secouant, toutes les billes se rassemblent en s'organisant selon la structure hexagonale : les forces capillaires rapprochent les billes et les ordonnent dans la configuration la plus compacte.



↑ MANIPULATION 63

L'eau est une colle

On peut réaliser une chaînette de billes de polystyrène liées entre elles juste par de petits ponts capillaires.

L'EAU ET LES GRAINS

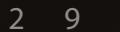
La cohésion capillaire n'est pas le seul fruit de l'interaction entre les grains et l'eau. Celle-ci entretient d'autres rapports avec la matière. Ainsi, lorsqu'elle est en mouvement, elle modèle la surface d'un milieu granulaire de différentes façons. Son écoulement crée des reliefs d'érosion, phénomène que l'on retrouve dans nos petits bacs de sable aussi bien qu'à l'échelle de nos paysages ou d'un mur en pisé exposé à la pluie, sur lequel les particules les plus fines se retrouvent arrachées de leur substrat pour ne laisser apparaître au fil du temps que les gros grains de matière. Un autre exemple est fourni par les rides de sable crées par le va-et-vient des vagues au bord de la plage.
Au-delà des interactions de surface, l'attention est portée sur l'eau contenue dans l'espace poreux, afin de revenir sur la notion de porosité et d'observer comment l'eau peut d'elle-même se déplacer par capillarité à l'intérieur d'un mur.



↑ MANIPULATION 77

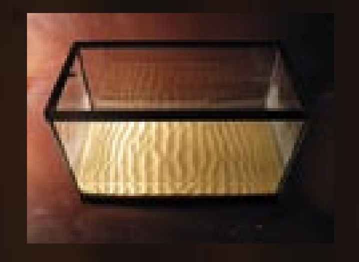
La dilatance

Du sable fin est humidifié de telle sorte qu'il soit proche de sa limite de saturation tout en gardant une certaine cohésion. On fait alors une petite colonne sur une plaque vibrante. Lorsqu'on vibre, le sable se liquéfie peu à peu jusqu'à prendre la forme d'une crêpe. Sa surface est couverte d'eau. Dès qu'on saisit cette crêpe, le sable sèche instantanément et il est à nouveau possible de faire une colonne et de recommencer l'expérience.









↑ MANIPULATION 71

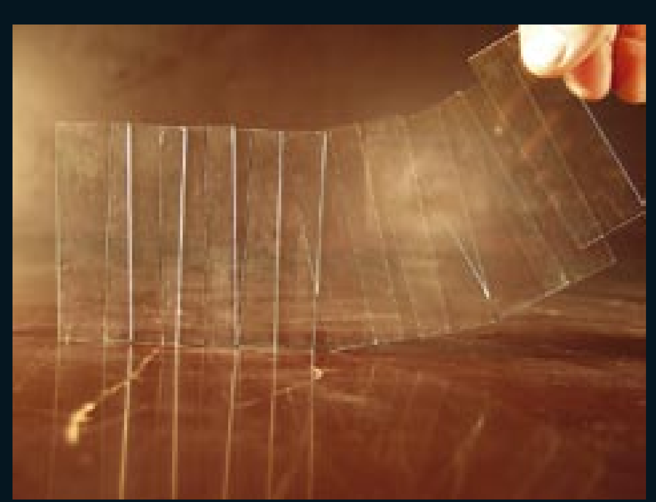
Rides de sable en bord de plage

Dans un aquarium rempli de sable et d'eau, on recrée le mouvement de va-et-vient des vagues. Petit à petit le relief du sable évolue jusqu'à imiter les rides de sables de bord de plage.

LES ARGILES

Les argiles sont des microparticules à faciès lamellaire. Ce sont des phylosilicates hydratés (du grec phullon signifiant « qui a l'aspect de feuille »). Leurs spécificités de taille et de forme les différencient des autres grains, leur conférant en particulier des propriétés de cohésion et de plasticité très importantes. Il est courant de considérer la terre comme un béton dont l'argile serait le liant. En réalité, si on observe la matière de plus près, on découvre que l'eau est le véritable liant de la terre. Les argiles sont juste des grains dont la taille et la forme particulières permettent aux forces capillaires d'être beaucoup plus importantes.



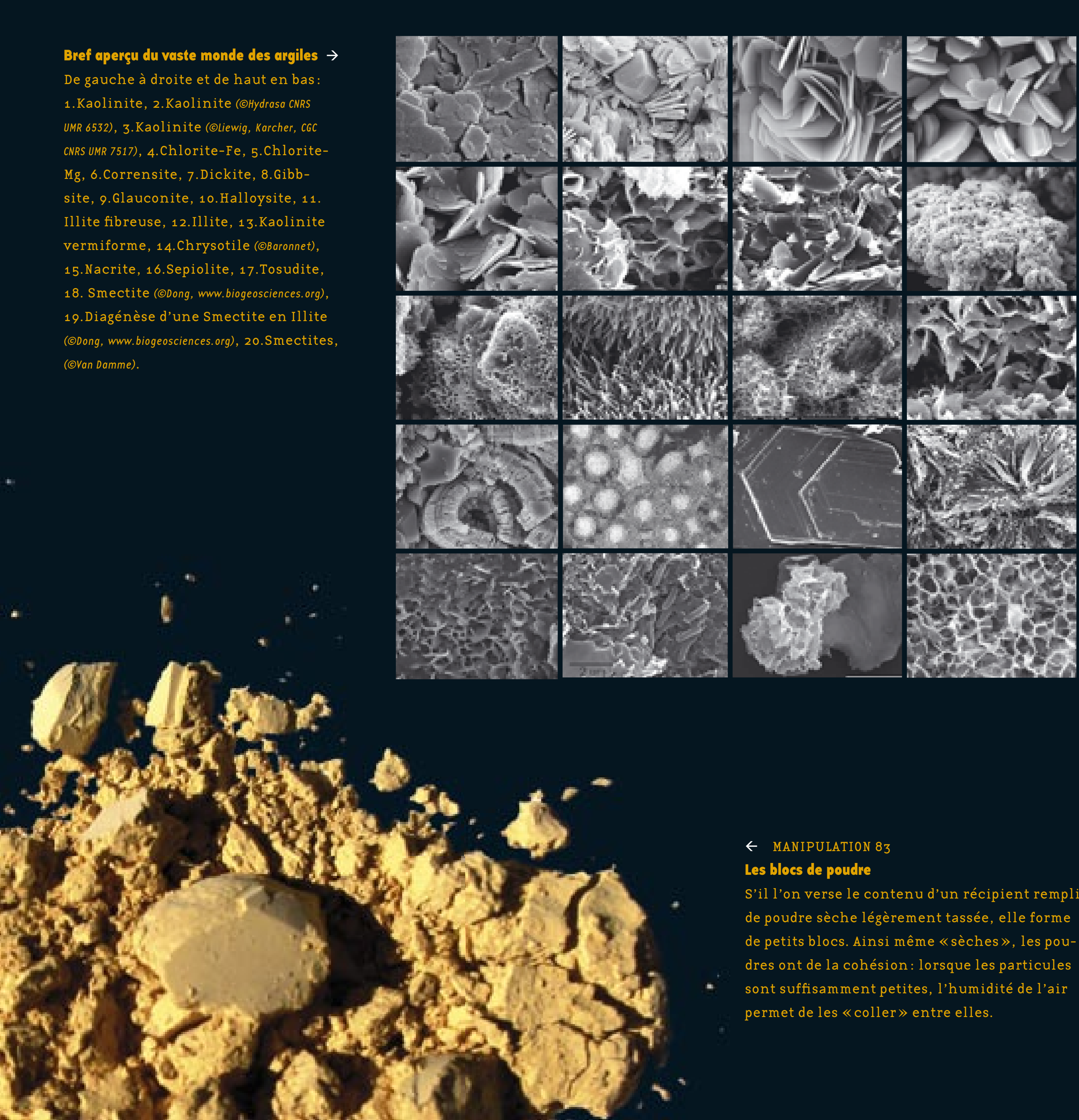


←↓ MANIPULATION 81

Cohésion capillaire et plasticité des argiles

Un peu de buée suffit à coller des plaques de verre entre elles. Des objets plans sont beaucoup plus sensibles aux forces capillaires que des objets sphériques car leur surface de contact est beaucoup plus grande. Des plaques de verre ou des lames de microscope humides sont empilées face contre face. Elles sont impossibles à décoller mais il est facile de les faire glisser l'une sur l'autre. Ce déplacement face contre face est responsable de la grande plasticité des argiles.





Bref aperçu du vaste monde des argiles →

De gauche à droite et de haut en bas : 1.Kaolinite, 2.Kaolinite *(©Hydrasa CNRS UMR 6532)*, 3.Kaolinite *(©Liewig, Karcher, CGC CNRS UMR 7517)*, 4.Chlorite-Fe, 5.Chlorite-Mg, 6.Corrensite, 7.Dickite, 8.Gibbsite, 9.Glauconite, 10.Halloysite, 11. Illite fibreuse, 12.Illite, 13.Kaolinite vermiforme, 14.Chrysotile *(©Baronnet)*, 15.Nacrite, 16.Sepiolite, 17.Tosudite, 18. Smectite *(©Dong, www.biogeosciences.org)*, 19.Diagénèse d'une Smectite en Illite *(©Dong, www.biogeosciences.org)*, 20.Smectites, *(©Van Damme)*.

← MANIPULATION 83

Les blocs de poudre

S'il l'on verse le contenu d'un récipient rempli de poudre sèche légèrement tassée, elle forme de petits blocs. Ainsi même « sèches », les poudres ont de la cohésion : lorsque les particules sont suffisamment petites, l'humidité de l'air permet de les « coller » entre elles.

← MANIPULATION 91

Le gonflement et le retrait

Les argiles ont des capacités de rétention d'eau différentes : on parle d'argiles gonflantes lorsque celles-ci absorbent beaucoup d'eau. Lorsqu'une pâte d'argile sèche, la plus grande partie de l'eau s'évapore et l'argile fissure. Les différences de gonflement des argiles impliquent des différences de retrait.





Mélange de granulats et mortier pour la restauration des murs en pisé →



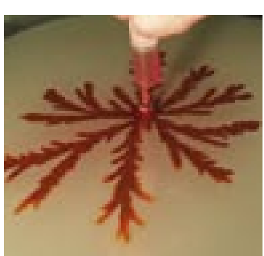












← MANIPULATION 90

Les gels

Un gel de montmorillonite (argile gonflante) est étalé entre deux plaques de verre de sorte qu'il forme une sorte de crêpe. Un petit trou au centre de la vitre supérieure permet d'injecter un liquide moins visqueux au sein du gel. On assiste alors à la morphogenèse d'un arbre fractal.





↓ MANIPULATION 91 **Les dispersions colloïdales et les boues**

Les boues d'argile, tout comme les eaux naturelles, le sang, les pâtes dentifrices, les peintures ou les ciments en cours de prise, sont des dispersions colloïdales, c'est-à-dire des systèmes formés d'un liquide (l'eau) dans lequel sont immergées des particules solides de taille inférieure ou voisine de 1 μm (argiles). Les dispersions peuvent être dans un état fluide, pâteux ou solide, suivant les interactions entre particules dispersées.



←→ **Boues**

1. atapulgite, 2. terre à pisé tamisée à 100 μm, 3. terre rouge tamisée à 100 μm, 4. kaolinite, 5. montmorillonite, 6. silt noir (terre d'Isère tamisée à 100 μm), 7. silt beige (déchet de lavage de la carrière Peysson).







HISTORIQUE ET PERSPECTIVES



Le projet « Grains de Bâtisseurs - La matière en grains, de la géologie à l'architecture » a démarré en septembre 2004. Une centaine d'expériences ont été mises au point et présentées lors de différentes manifestations à des enfants, des étudiants et des adultes.

La 4e édition du festival Grains d'Isère : « Graines de terre, architecture, arts et sciences », aux Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau à Villefontaine, dans le cadre du Contrat Global de Développement « Isère, Porte des Alpes », a permis de présenter l'atelier à environ 2 600 personnes, dont plus de 700 scolaires (maternelles, primaires, secondaires et centres de loisirs).



Le contenu scientifique de « Grains de Bâtisseurs » en fait également un véritable outil pédagogique nouveau adapté à l'enseignement supérieur, permettant à des étudiants d'écoles d'architecture, écoles d'ingénieurs et écoles d'art, d'acquérir des connaissances profondes du caractère intrinsèque de la matière en grains. Il en va de même pour les formations professionnelles.

L'atelier est également disponible sous forme d'exposition itinérante. D'autres supports de médiation, comme un DVD d'accompagnement des expériences destiné aux enseignants ou une valise pédagogique miniaturisée et de terrain, ou, plus simplement, des conférences - ateliers ainsi que des clips vidéo, présentent toutes les expériences de « Grains de Bâtisseurs », consultables sur les sites internet des Grands Ateliers (GA-Media, www.lesgrandsateliers.fr) et de CRATerre (www.craterre.archi.fr).

Rendez-vous fin mai et début juin de chaque année pour participer au festival des « Grains de Bâtisseurs ».



UN LIEU POUR EXPLORER LA MATIÈRE

Face à l'originalité et aux potentialités d'une telle démarche, on peut imaginer un lieu exclusivement consacré à l'exploration de la matière en grains s'inspirant et s'appuyant sur l'expérience scientifique et pédagogique élaborée dans le cadre de l'atelier « Grains de Bâtisseurs ».

BIBLIOGRAPHIE

Ayer J., Bonifazi M., Lapaire J., *Le sable – Secrets et beautés d'un monde minéral*, Muséum d'histoire naturelle de Neuchâtel, 2003

Bak P., *Quand la nature s'organise, avalanches, tremblements de terre et autres cataclysmes*, Flammarion, 1996

Cabane B., Hénon S., *Liquides : solutions, dispersions, émulsions, gels*, Belin, 2003

Centre Sciences, CCSTI région Centre et Agora des sciences, CCSTI Marseille, *Jeux de grains, tas de sable et graines d'avalanches,* exposition, 2004

Daoud M., Williams C., *La juste argile : Introduction à la matière molle*, Les éditions de Physique, 1995

De Gennes P-G., Brochard-Wyart F., Quéré D., *Gouttes, bulles, perles et ondes*, Belin, 2002

Duran J., *Sables émouvants : la physique du sable au quotidien*, Belin, Pour la Science, 2003

Duran J., *Sables, poudres et grains*, Eyrolles Sciences, Paris, 1997

Guyon E., Hulin J.-P., Petit L., *Ce que disent les fluides, La science des écoulements en images*, Belin, Pour la science, 2005

Guyon E. et Troadec J. P., *Du sac de billes au tas de sable*, Editions Odile Jacob, Paris, 1994

Ildefonse B., Allain C., Coussot P., *Des grands écoulements naturels à la dynamique du tas de sable – Introduction aux suspensions en géologie et en physique*, Cemagref Editions, 1997

Jensen P., *Entrer en matière, les atomes expliquent-ils le monde ?*, Editions Le Seuil, 2001

Meunier A., *Argiles*, CPI, GB Science Publisher, 2003

Prost A., *La terre, 50 expériences pour découvrir notre planète*, Belin, Pour la science, 1999

Rautureau M., Caillère S., Hénin S., *Les argiles*, Editions Septima, 2nde édition, 2004

REMERCIEMENTS

ENSAG *(Ecole Nationale Supérieure d'Architecture de Grenoble)*, Grenoble- **Vincent Michel**
EAPM *(Ecole d'Architecture de Paris Malaquais)*, Paris - **Antonin Lacomme**
Ecole Régionale des Beaux Arts, Saint-Etienne - **Jean-Marc Bonnard**
Université Joseph Fourier, Grenoble - **Annie Luciani**, **ACROE-ICA**, **CLIPS**, **IMAG - Jean-Paul Laurent**, **David Gélard**, **LTHE - Michel Dayre**, **Yves Orengo**, **IRIGM**
Université Claude Bernard, Lyon - **Pablo Jensen**, Département de Physique de la Matière
Université Pierre & Marie Curie, Paris VI - **Jacques Treiner**, **LPTMS**
ESPCI *(Ecole Supérieure de Physique et de Chimie Industrielles)*, Paris - **Jacques Duran - Evelyne Kolb**, **Jean-Claude Charmet**, **PMMH**
INSA *(Institut National de Sciences Appliquées)*, Lyon - **Christian Olagnon**, **Sandrine Maximilien**, **Gilbert Thollet**, **Véronique Massardier**, **Florent Dalmas**, **Emilie Lataste**, **GEMPPM - Aude Lapprand**, **LMM**
INPG *(Institut National Polytechnique de Grenoble)*, Grenoble- **Emmanuel Aguila**, **ENSEEG**
ENTPE *(Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat)*, Lyon - **Ali Mesbah**
CCSTI *(Centres de Culture Scientifique, Technique et Industrielle)* - **Hubert Jeannin**, **Vanessa Stefanovitch**, *CCSTI Chambéry*
Laurent Chicoineau, **Tiana Delhome**, **Cécile Mériguet**, *CCSTI Grenoble* - **Olivier Morand**, *CCSTI de la région Centre*
Grands Ateliers, Villefontaine - **Myriam Olivier**, **Alain Snyers**, **Joël Gourgand**, **Maurice Nicolas**, **Roland Mathieu**, **Françoise Aubry**, **Orlane Bechet**
Carrière Sika, Hostun - **Louis Clappier**
Carrière Gachet, Artas - **Philippe Gachet**
Carrière Peysson, Saint Nazaire en Royans - **Elie Peysson**
Isère, Porte des Alpes - **Georges Colombier**, **Armand Bonnamy**, **Franck Chenevier**, **Florence Chassac**
EPIDA - **Michel André Durand**, **Bernard Millérioux**
SAN - **Alain Rossot**

CONTACTS
craterre@club-internet.fr
www.craterre.archi.fr
www.lesgrandsateliers.fr

Dépot légal décembre 2005
ISBN 2-906901-40-7

TABLE DES MATIÈRES

ARTAS
BADINIERES
BEAUVOIR DE MARC
BONNEFAMILLE
BOURGOIN-JALLIEU
CHÂTEAUVILLAIN
CHATONNAY
CHEZENEUVE
CRACHIER
CULIN
DIEMOZ
DOMARIN
ECLOSE
FOUR
LA VERPILLIERE
LES EPARRES
LIEUDIEU
L'ISLE D'ABEAU
MAUBEC
MEYRIE
MEYRIEU LES ETANGS
MEYSSIEZ
MONTCARRA
NIVOLAS-VERMELLE
ROCHE
ROYAS
RUY-MONTCEAU
SAINT-AGNIN-SUR-BION
SAINT-ALBAN-DE-ROCHE
SAINT-CHEF
SAINT-HILAIRE-DE-BRENS
SAINT-JEAN-DE-BOURNAY
SAINT-MARCEL-BEL-ACCUEIL
SAINT-QUENTIN-FALLAVIER
SAINT-SAVIN
SAINTE-ANNE-SUR-GERVONDE
SALAGNON
SATOLAS-ET-BONCE
SAVAS-MEPIN
SEREZIN-DE-LA-TOUR
SUCCIEU
TRAMOLE
TREPT
VAULX-MILIEU
VENERIEU
VIGNIEU
VILLEFONTAINE
VILLENEUVE-DE-MARC

ISBN 2-906901-40-7



Comprendre l'infiniment petit pour découvrir, expliquer et construire l'infiniment grand... Cet ouvrage ouvre les portes d'un laboratoire de la matière et vous invite à explorer de manière simple et ludique l'univers scientifique des grains.
Alors que nous avons tous un jour essayé de construire le plus beau château de sable, nous sommes-nous demandé une fois seulement comment ces milliards de petits grains pouvaient s'assembler pour construire un édifice royal ?
Pour ceux qui ne veulent pas percer les secrets du château de sable alors n'ouvrez pas ce livre... Pour les autres, bienvenue dans l'atelier pédagogique des Grains de Bâtisseurs. Tel un voyage initiatique au cœur de la matière en grains, ce livre est une belle leçon de géographie qui immanquablement changera votre regard sur la terre, les paysages et les constructions qui vous entourent.

Georges COLOMBIER
Député de l'Isère
Président du Contrat Global de Développement d'Isère, Porte des Alpes

Armand BONNAMY
Conseiller Régional
Vice-président du Contrat Global de Développement d'Isère Porte des Alpes

Il y a ici dans ce travail autour de la matière en grains, un génie collectif à l'œuvre et qui peut faire école.
La coopération de jeunes scientifiques remarquables avec le laboratoire CRATerre fort de trente ans d'expérience internationale, ouvre un champ encore inexploré.

Fruit du croisement des sciences de l'homme et de la société avec celles fondamentales de l'ingénieur, ancrées dans un établissement tout entier dédié à l'architecture, les recherches conduites dessinent de nouvelles perspectives : rapprocher l'investigation scientifique la plus en pointe avec le besoin urgent de partager la culture scientifique, technique et industrielle avec un large public.

Cet ouvrage « Grains de Bâtisseurs » donne à comprendre ce que peuvent apporter les Grands Ateliers de l'Isle d'Abeau et leur nécessaire développement au service d'un territoire et des besoins de la société.
Ce livre témoigne enfin qu'une nouvelle culture peut naître réconciliant l'homme et son environnement, le travail et la qualité de la vie.

Vincent MICHEL
Directeur de l'école nationale supérieure d'architecture de Grenoble



RhôneAlpes Région

